

# Research on Intelligent Early Warning Technology and Prevention Mechanism for Safety Risks in High-rise Residential Structure Construction

Liqun Yu

Ji'an Yinluling Construction Engineering Co., Ltd., Ji'an, Jiangxi, 331511, China

## Abstract

For a 30-story shear wall residential building with significant elevation differences, frequent process overlaps, and temporary components subjected to structural loads, an integrated approach of “risk identification—intelligent early warning—closed-loop prevention and control” was proposed. The study first identified seven critical risk categories through literature review and two rounds of Delphi method: falls, collisions, formwork expansion, deflection amplification, scaffolding instability, slab-column shear failure, and early-age strength lag. A four-dimensional early warning indicator system was subsequently developed, incorporating personnel behavior, equipment status, environmental conditions, and structural performance. After AHP weighting and temporal weight iteration, the system was embedded with a BPNN-RF-SVM soft voting integration model to achieve dynamic inference at 5-minute granularity. Field validation conducted from April to August 2025 demonstrated improved system performance: warning accuracy increased from 75% to 92%, accident rate decreased from 1.2% to 0.3%, and closed-loop rectification rate rose from 80% to 98%, with stable performance even under high-wind conditions and nighttime casting scenarios. This research provides a replicable risk quantification and real-time intervention paradigm for high-rise residential construction.

## Keywords

high-rise residential buildings; construction safety; risk identification; intelligent early warning; closed-loop prevention and control

# 高层住宅结构施工安全风险智能预警技术及防控机制研究

余立群

吉安市银庐陵建筑工程有限公司, 中国·江西吉安 331511

## 摘要

面向高差大、工序交叉频繁且临时构件参与受力的30层剪力墙住宅, 提出“风险识别—智能预警—闭环防控”一体化方法。首先以文献归纳与两轮德尔菲法收敛出坠落、碰撞、胀模、挠度放大、脚手架失稳、板柱冲切及早龄期强度滞后7类关键风险; 继而构建人员行为、设备状态、环境条件、结构性能四维预警指标体系, 经AHP赋权与时段权重迭代后嵌入BPNN-RF-SVM软投票集成模型, 实现5 min粒度动态推断。2025年4—8月现场验证显示, 系统预警准确率由75%升至92%, 事故发生率自1.2%降至0.3%, 隐患整改闭环率由80%提至98%, 且在高风及夜间浇筑场景下保持稳定。研究为高层住宅施工提供了可复制的风险量化与实时干预范式。

## 关键词

高层住宅; 施工安全; 风险识别; 智能预警; 闭环防控

## 1 引言

我国高层住宅持续向百米量级攀升, 高空作业面扩大、临时支撑与永久结构交替受力, 使传统“经验+规范”式安全管理难以实时匹配动态风险。南京市雨花台区30层剪力墙项目即因塔机交叉、泵送侧压峰值误判及风荷载耦合, 曾在同类工地引发模板胀模与脚手架整体失稳事件。将物联网、多源数据融合与机器学习引入施工安全管控, 已成为行

业共识, 但现有研究多聚焦单一风险或静态阈值, 缺乏面向工序场景、具备时段敏感性的实时预警与可执行干预链条。本研究以现场连续监测数据为基础, 构建风险识别—智能预警—闭环防控一体化技术体系, 旨在为高层住宅施工提供可量化、可迁移的安全管理升级路径。

## 2 高层住宅结构施工安全风险识别方法研究

鉴于高层住宅结构施工呈现空间高差大、工序交叉频繁、临时构件参与受力的情境, 本研究把高空作业、结构荷载阶段性变化、临时支撑体系稳定性作为识别主轴。结合南京市雨花台区某30层剪力墙住宅项目现场调研, 汇集2025年4

【作者简介】余立群(1991-), 中国江西吉安人, 本科, 一级建造师, 从事建筑工程及管理研究。

至8月塔机运行日志、模板支撑配置、浇筑顺序与楼层风速监测等资料,进行风险语境校准。方法上,运用文献归纳法梳理规范、事故调查与论文中的致损机理,形成初始事件池;引入德尔菲法这一多轮匿名咨询以凝聚专家判断,邀请结构设计、施工技术、监理与安全管理等4类共16名专家开展2轮迭代,按可检验性与可操作性收敛并修订条目。进一步观察显示,关键风险因素集中在塔机吊装与临边交叉作业诱发的坠落与碰撞,泵送侧压力峰值误判导致的模板胀模,不对称施工阶段荷载路径迁移引起的楼层挠度放大,外脚手架在风荷载耦合作用下的整体稳定性削弱,楼面集中堆载触发的板柱冲切超限,以及早龄期强度发展滞后导致的临支提前卸载隐患。由此把文献证据、专家共识与项目数据进行交叉校验,构建具备工序指向性与时段敏感性的风险清单<sup>[1]</sup>。

### 3 高层住宅结构施工安全风险智能预警技术体系构建

#### 3.1 预警指标体系建立

鉴于南京市雨花台区30层剪力墙住宅项目存在高差大、工序交叉与临时支撑参与受力的施工语境,本研究把预警指标库建立在人员行为、设备状态、环境条件以及结构力学性能四个维度之上,强调指标与工序场景的直接对应关系。人员行为维度聚焦关键作业面的风险暴露度,把高处作业合规率、临边电子围栏触发频次、塔机回转半径下交叉作业干涉事件数以及危险区域停留时长作为核心,依靠超宽带定位、视频识别与门禁数据来进行获取。设备状态维度服务于塔机吊装与混凝土泵送场景,把塔机力矩利用率、风速联锁动作频次、回转制动异常次数、输送管线侧压力峰值及其上升速率以及模板支撑立杆竖向位移作为监测对象,数据来源涵盖塔机黑匣子、压力传感与位移监测。环境条件维度紧扣楼层风环境与降雨过程,把楼层风速与阵风系数、降雨强度与温度湿度曲线纳入指标,采用分层布点的风速监测与现场气象站联动来进行采集。结构力学性能维度面向阶段性荷载路径变化,把楼层竖向挠度增长速率、板柱冲切安全储备表征量、混凝土早龄期强度发展指数以及外脚手架全局侧移与加速度作为重点,借助应变计、位移计与成熟度测点来获得<sup>[2]</sup>。

为避免指标堆砌并让权重分配契合风险机理,采用层次分析法对四维指标开展成对比较,层次分析法是一种基于专家判断的多准则权衡方法,可凭借判断矩阵反映相对重要性。本研究邀请结构设计、施工技术、监理与安全管理等4类共16名专家结合事故机理与项目数据给出判断矩阵,经一致性检验后形成维度权重与二级指标权重,同时设置分级阈值以适配4至8月高风与高强度泵送的时段特征。在运行侧,把指标设计为可测性、敏感性与可干预性并重,采样粒度在人员与设备侧设定为1s,环境为10s,结构为5min,结合滑动窗口平滑与突变识别来提高告警稳定性;在14层及以上楼层与台风预警日开展时段性权重迭代,使环境与设

备权重得到提升,而夜间浇筑阶段把人员与结构权重维持在更高占比。阈值标定依托规范限值与项目历史分位统计进行双源校准,触发后的告警级别能够把处置动作映射到停吊、减载、延迟拆模与加固复核等明确路径,从而形成面向作业工序且具备时段敏感性的可执行预警指标体系<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 预警模型算法选择与优化

围绕雨花台区30层剪力墙住宅的多源异步数据,本研究把BP神经网络、随机森林与支持向量机在非线形刻画、样本规模敏感性及推断时延上开展针对性评估,并据此构建以融合为核心的预警方案。考虑类不平衡与时变漂移,采用滑动窗口把1s与10s序列对齐至5min尺度,提取力矩利用率增长率、侧压力峰值梯度与阵风系数突变幅等特征,经z-score归一化进入训练。参数优化层面,在BP中配置3层感知机并引入focal loss,在随机森林中设置代价敏感权重,在支持向量机中选用RBF核并实施Platt标定,三类模型由贝叶斯优化搜索超参数并采用时间分块交叉验证。部署阶段把软投票作为集成机制,按延时与召回表现动态分配权重,并在台风预警与夜间浇筑场景启用阈值迁移,以偏向高等级告警并维持快速响应。

$$L = \arg \max_{k \in \{1,2,3,4\}} \sum_{m \in \{BPNN, RF, SVM\}} \alpha_m P_m (y=k | x_t)$$

其中, $L$ 表示预警等级, $k$ 为候选级别, $m$ 为基础模型, $\alpha_m$ 为模型权重, $P_m$ 为对应模型对级别的后验概率, $x_t$ 为时刻 $t$ 的特征向量。

#### 3.3 预警系统架构设计

面向南京市雨花台区30层剪力墙住宅的多源异步数据环境,本研究把智能预警系统构建为数据采集—预处理—分析—预警—可视化的闭环架构。数据采集层把塔机黑匣子、输送管线侧压与上升速率传感、模板支撑立杆位移计、UWB人员定位、视频识别、分层风速与气象站以及混凝土成熟度测点进行接入,在塔机基座与回转平台、泵送站、外脚手架立面以及14层及以上楼层布设边缘网关,把设备状态、人员行为、环境条件与结构力学性能的原始序列稳定上传。边缘计算层把多协议接入、时间同步与数据质控纳入统一处理,依靠滑动窗口平滑与突变识别去滤除噪声与漂移,把1s与10s粒度对齐到5min窗口,并在本地生成力矩利用率增长率、阵风系数突变幅、侧压力梯度等特征,同时把丢包重传与断点续传作为保障机制以应对施工现场网络波动。云端分析层把流式数据总线、时序数据库与模型服务进行解耦部署,选用集成式预警模型承载多源特征的在线推断,并把场景标签与阈值迁移策略与模型权重联动,使台风预警与夜间浇筑时段的高等级告警更快被触发。预警决策层把告警等级与处置路径绑定到停吊、减载、延迟拆模与加固复核等动作,设置规则引擎把模型输出映射为任务单,联动塔机联锁与泵送控制台的控制接口,同时把人员短信与移动端弹窗作为现场触达。可视化层把BIM模型当作空间载体

来使用,把UWB定位与监测点位进行绑定,构建塔机力矩实时仪表、风速剖面曲线、模板位移趋势与危险区域热区的多视角大屏,并把事件时间线、处置闭环与指标回溯展示给施工技术、监理与安全管理三类角色。结合项目布点与作业节律,系统把阈值、权重与告警策略按楼层与时段进行动态迭代,同时把设备证书、链路加密与访问控制纳入运维侧的基线配置,以在高差大、工序交叉与临时支撑参与受力的语境下维持稳定的预警输出<sup>[4]</sup>。

## 4 高层住宅结构施工安全风险防控机制的效果评估

### 4.1 防控机制的实践应用

鉴于南京市雨花台区30层剪力墙住宅项目存在高差大与工序交叉等制约,本研究把智能预警技术嵌入施工组织,建立由预警触发、应急响应、措施整改与效果跟踪构成的闭环防控机制,并在项目全周期开展应用。

在预警触发环节,系统把4个维度指标经集成模型映射为分级处置,规则引擎生成任务单与控制边界,告警并行推送至施工单位项目经理部、监理驻场机构与建设单位项目代表;应急响应由施工单位现场总指挥统筹,安全管理部下达停吊停泵,设备组联动塔机联锁与泵压卸载,工长完成人员撤离,监理签发暂停令,建设单位协调外部支援。

措施整改环节由施工技术负责人联合结构工程师开展成因分析与方案设计,围绕模板支撑加密、外脚手架连墙件补强与泵送节奏调整提出措施,安全管理部把方案拆解为作业票与清单,设备组完成维保校准,监理审查合规性后出具

实施意见,建设单位对涉及变更的资源与资金进行确认。

效果跟踪环节把关键指标在连续2至3个监测窗口内复核,系统输出恢复趋势与退出建议,监理复验并签署意见,施工单位提交复工申请,建设单位组织三方会商形成闭环纪要;机制同步设定响应时限与角色SLA,确认不超过1min、控制不超过5min、报审不超过30min,并把处置记录与监测曲线写入风险台账以供阈值校准与权重迭代<sup>[5]</sup>。

### 4.2 防控效果的量化评估

鉴于南京市雨花台区30层剪力墙住宅项目在2025年4至8月形成连续可观测数据,本研究把量化评估建立在统一统计口径之上,按基线期与应用期划分时段,对系统告警与监理签发、塔机黑匣子和泵送日志开展逐条核对,以降低标签偏差。预警准确率定义为告警与事件一致性的占比,事故发生率以5min监测窗口为统计单位并按有效窗口归一化,隐患整改完成率以规则引擎生成任务单的闭环占比表征,同时在台风预警日与夜间浇筑进行分层,以控制环境与工序强干扰。表1对比表明,三项指标在应用期均呈提升或下降的明显变化,分别对应风险识别正确性增强、事件端发生频度降低以及处置端闭环效率提高。由此推导,权重迭代与阈值迁移把14层及以上楼层的外脚手架与塔机吊装场景置于更高敏感等级,使提前干预成为可能;SLA约束与任务单闭环追踪把停吊、减载、延迟拆模与加固复核固化为规则后,跨角色协同被显著加速。为排除作业量波动干扰,本研究引入工时标准化与楼层分带复核,结论在各分层下保持稳定,同时对异常高风与集中浇筑时段开展敏感性分析,指标变化方向未出现逆转,误报抑制比呈下降趋势。

表1 雨花台区30层剪力墙住宅项目防控机制实施前后效果对比表

指标	统计口径	实施前	实施后	变化幅度
风险预警准确率	告警与事件一致性占比,经人工复核	75%	92%	+17.0个百分点
事故发生率	以5min监测窗口为单位并按有效窗口归一化	1.2%	0.3%	-0.9个百分点
隐患整改完成率	规则引擎任务单闭环占比	80%	98%	+18.0个百分点

## 5 结语

现场4个月连续运行表明,只要把风险识别锚定于工序与时段,把预警指标嵌入多源异步数据流,并通过规则引擎将模型输出映射为停吊、减载、加固等具体动作,高层住宅施工安全即可从“事后整改”转为“事前干预”。研究形成的四维指标库、集成模型与闭环处置流程,已随项目楼层升高与台风过境完成两轮权重自迭代,验证了其环境鲁棒性与场景可迁移性。未来将在装配式高层、超高层及城市更新项目中进一步验证模型跨结构体系适用性,并探索数字孪生驱动的反向优化,实现安全、质量与进度的多目标动态平衡。

## 参考文献

- [1] 周传均.基于计算机视觉的建筑施工危险前兆信息识别研究[J].智能城市,2025,(11):157-160.
- [2] 回硕,孙莉萍,于全月,杨铭扬.建筑施工高处坠落事故成因及人工智能安全防护技术研究进展[J].工业安全与环保,
- [3] 曾大林,肖方正,姜志超,张海洋.数据驱动下建筑施工安全隐患关联分析与预警策略[J].中国安全科学学报,2025,35(05):56-63.
- [4] 马超.高层建筑消防安全管理系统设计[J].今日消防,2025,10(04):80-82.
- [5] 姚鹏.基于物联网多源数据融合的施工机械潜在碰撞风险预警[J].物联网技术,2025,15(13):53-55.